

V-39 支圧強度に関する理論的考察

鳥取大学 正会員 阪田 憲次
鳥取大学 正会員 ○木山 英郎
鳥取大学 正会員 西林 新蔵

1 はじめに

支圧強度試験は図-1に示すように、直径 d 、高さ h の円柱形供試体を下面を平面圧板上におき、上面と直径 d_0 の円柱形支圧板で部分圧縮し、破壊させる試験である。破壊時の荷重を P 、支圧面積を A_b とすれば支圧強度 σ_u は次式で計算される。

$$\sigma_u = -P/A_b = -4P/\pi d_0^2 \quad (1)$$

従来の研究の多くは、支圧強度および破壊形状が供試体の形状比 h/d 、支圧面積 A_c と支圧面積との比 A_c/A_b 、骨材の種類やコンクリートの強度等の影響を受けることを報告し、 σ_u と圧縮強度 σ_c との関係を様々な実験式的形で提案している。

筆者らは、供試体中の応力分布とコンクリートの破壊条件とから、支圧強度と上述の諸因子との関係を理論的に究明できるのではないかと考えてこの研究を実施した。

2 応力分布

供試体中の応力分布を弾性理論によって解析するに当たって次の2つの仮定を設ける。一つは、圧板は剛体であるとし、これと供試体下面との間に摩擦力が作用しないものとする(仮定1)。一つは上面の支圧板による荷重分布は等分布とする(仮定2)。仮定1は圧板と剛体とすることには問題がないが、摩擦力については供試体の高さが小さい($h/d < 1$)ときには多少問題がある。仮定2は接触圧の理論によれば、支圧板の円周に適當な丸味をつけることによってほぼ等分布が得られる。またここでは仮定1と同様摩擦力を無視するが、支圧板が小さいとき($d_0/d < 0.3$)には実用上許されることは真載荷圧試験の報告で述べた通りであり、大きいときには仮定1と同様問題である。

上述の仮定のもとに支圧を受ける円柱供試体中の応力分布をMichellの応力関数を用いた斎藤氏の解法を利用して解析した。供試体中の各点の応力は供試体形状比 h/d 、載荷面積比 A_c/A_b (たんに

載荷割合として $d_0/d = \sqrt{A_b/A_c}$ を用いる)、および供試体のポアソン数 m に関係する。そこで $h/d = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の供試体について、載荷割合を $d_0/d = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.9$ ($A_c/A_b = 100, 25, \dots, 1.2$)の9種とし、ポアソン数を $m = 4, 6, 8$ の3種について、供試体中心軸($r=0$)上の各点について、鉛直方向の応力 σ_z 、これと直角な水平方向の応力 σ_r, σ_θ を計算した。中心軸上ではこれらは3つの主応力であり、かつ $\sigma_r = \sigma_\theta$ である。応力分布の一例を示せば図-2のようである。図

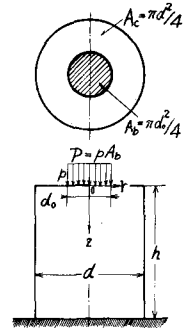


図-1

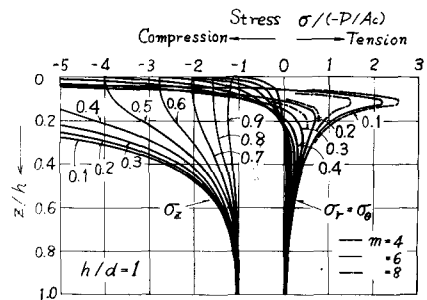


図-2

の縦軸は供試体上面からの距離 z/h であり、横軸は応力の値を $-P/A_c$ で除した値である。

応力分布の特長を述べるとつぎのようである。(i) 鉛直方向主応力 σ_z は常に圧縮応力であり、水平方向主応力 $\sigma_r (= \sigma_\theta)$ は下部では引張応力であるが、上部では圧縮応力に転じ、支圧板付近では両主応力とも大きな圧縮応力となり、3軸対称状態を呈している。(ii) 引張応力 σ_r は、圧縮応力 σ_z に比べると各点においておよそ1桁値が小さいが、 σ_z がポアソン数 m の影響をほとんど受けないと見做せるのに対して、 σ_r は m の影響を割合大きく受ける。ことに載荷割合が小さい ($\alpha_0/d < 0.3$) とときに支圧板近く ($z/h = 0.3 \sim 0.1$) に生ずる引張応力のピークへの m の影響は大きい。したがってこの付近の応力状態が供試体の破壊を支配するときには m の影響は無視できないと思われる。

(iii) σ_z は全面載荷のとき、どの横断面でも $\sigma_z = -1 \times (-P/A_c)$ であるが部分載荷の場合もサンブナの定理の通り、載荷長から離れるにつれて横断面全面に分布してゆき、 $\sigma_z = -1 \times (-P/A_c)$ となって落着く。したがって支圧試験における供試体の長さの影響は、この $\sigma_z = -1$ になることと、 $\sigma_r = 0$ になることとを考慮して $\alpha_0/d > 0.3$ では h/d が 1.5 以上では無視できることが解る。

3 破壊の条件

接触論によれば、供試体の上面、支圧板の円周部には大きな圧縮応力が生じることが予想される。それとともにこの部分には直径方向の σ_r が大きな引張応力となり、このため α_0/d が小さい場合には支圧板跡を示す円形の引張亀裂が生じる。しかし、この亀裂は支圧板直下の表層だけで最終的な破壊にはほとんど影響しないことと、さらに支圧板の角に丸味をつけることによって荷重は等分布に近づき、この破壊が生じにくくなることは先に報告した。したがってこの点の局部的な破壊を別にすれば、図-2 に示した中心軸上の応力分布が供試体の破壊を支配することに異存がない。しかし、各点の応力状態は相当複雑に変化しているから、どの点で破壊が開始し、そのときの荷重がいかほどであるかを算定することは容易でない。

そこで筆者らはつぎのような方法を用いることにした。まず供試体の圧縮強度を σ_c 、引張強度を σ_t としたとき、この2つのモール応力円の包絡放物線、

$$\tau^2 = \{ \sqrt{n+1} - 1 \}^2 \sigma_c (\sigma_c - \sigma) \quad \text{--- (2)}$$

を破壊曲線とし、ある点のモール応力円がこの曲線に接したときその点で破壊が生ずるとする(仮定3)。ここに n は圧縮・引張強度比 $-\sigma_c/\sigma_t$ である。 n を適当に変化させることによって(2)式は相当一般的破壊条件を表わすことができる。

この仮定のもとに、各点の応力状態から、各点の破壊発生の可能性の相対的尺度を示す破壊接近度(stress severity) S をつぎのように求めることができる。まず供試体中の応力値を任意の単位に揃えておき、それで描いた各点の応力円が(2)に接するまで載荷されたとした場合の破壊荷重の相対値 $\bar{P}$ を求める。ついで最も破壊しやすい点の荷重値 ($\bar{P}$ の最小値) $\bar{P}_{min}$ と各点の $\bar{P}$ との比とそれぞれ点の S 値とする。すなわち、

$$S = \bar{P}_{min} / \bar{P} \quad \text{--- (3)}$$

したがって、最も破壊しやすい点の S は 1 であり、一般に $S \leq 1$ なる点 ($1 > S > 0$) は $S=1$ の点で破壊する荷重ではまだ未破壊であり、その荷重の $1/S$ 倍の荷重が加えられたとき始めて破壊するといえる。この関係を示すため、 $h/d = 1$ 、 $\alpha_0/d = 0.5$ 、 $m = 6$ の供試体について $n = 10$ とした場合の(2)式の破壊曲線、 $S = 1$ なる点が破壊曲線に接した場合の各点のモール応力円とその S 値を図示

すると図-3 のようである。図から $S=1$ なる点 ($z/h=0.25$) が破壊するとき $S \approx 1$ の点 ($z/h=0.2, 0.3$) は破壊に近く、 $S < 1$ なる点はまだまだ破壊しそうにないことがわかる。

同じ応力状態についても n ($= -\sigma_c / \sigma_t$) が異なれば、当然 S の値も異なった値をとることは言うまでもない。そこで先に求めた種々の応力状態について、 $n=8, 10, 15$ とした場合の供試体中心軸上の S の値を求めた。1例を示すと図-4 のようである。同図は $h/d=1$ 、 $m=6$ の場合で、横軸に載荷割合 d_0/d 、縦軸に中心軸上の各点の位置 z/h

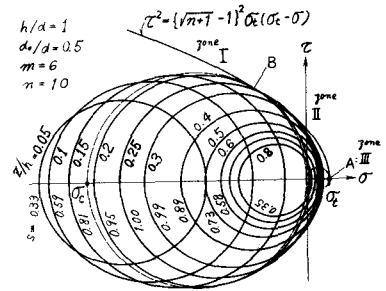


図-3

をとり、 S 値の等高線を描いてある。図中の I、II、III は図-3 に示した接点の範囲を示すもので、I は3主応力とも圧縮応力下での破壊、II、III は引張・圧縮応力下での破壊を

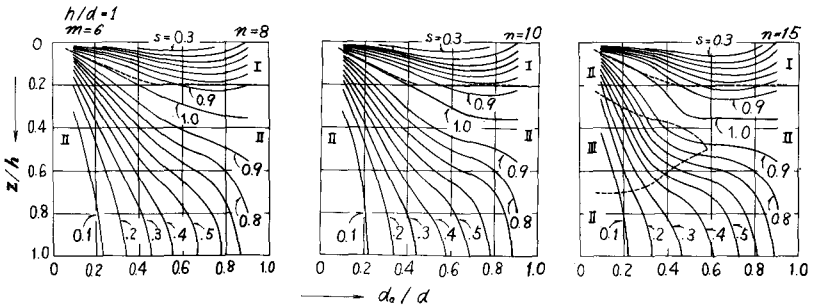


図-4

意味し、この範囲では引張応力の大きさに関与すること示す。どの範囲に属する応力状態で破壊が支配されるかによって破壊状況が異なってくるわけである。

この結果、(i) 高い封圧状態にある支圧板直下の S 値は低く、破壊しにくいこと、(ii) d_0/d が小さい場合には $S \approx 1$ の部分が狭く、 d_0/d が大きくなるほどその部分が広がり全体が同時に破壊しやすくなること、(iii) $S=1$ なる点は d_0/d が小さい場合には上部にあるが、 d_0/d が大きくなるにつれ下部へ移行する。 n が大きくなるほど d_0/d の小さい値で移行すること、(iv) $S=1$ なる点は引張応力の最大値の生ずる点とほぼ一致し(この点で m の影響は大きい)、すべて II の範囲に存し、引張応力および引張強度の影響は無視できないこと、等が認められた。

4. 支圧強度の表示式

供試体の破壊が前節の仮定に従えば、支圧強度試験における破壊荷重 P は σ_c および σ_t から算定できる。まず、破壊が $S=1$ なる点で起こるとすれば、そのときの荷重(破壊開始荷重) P_i と σ_c 、 σ_t との関係は、1例を示せば図-5 の点線で示したようである。ただし、 k_c は次式の値である。

$$k_c = (-P_i/A_c)/\sigma_c = (P_i/A_c)/n\sigma_t \quad (4)$$

とこ前記したように、支圧条件によって (i) $S \approx 1$ の範囲が極めて狭いもの (d_0/d が小) から、(ii) 広い範囲に亘って $S \approx 1$ となるもの (d_0/d が大) まで様々である。(i) の場合のように $S \approx 1$ なる点の応力が破壊曲線に接する荷重になっても、その範囲は小さく他の大部分がまだ充分耐圧力を有しているから破壊が進行することなく、

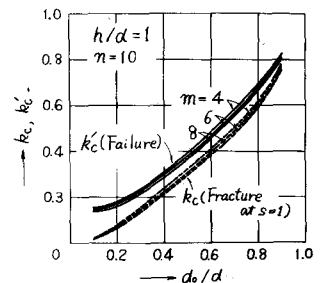


図-5

応力が再配分され新たな平衡状態を作り得る限り供試体全体の破壊には到らないであろうことが経験的に知られる。したがって支圧強度として (1) 式で定義される供試体全体の耐圧力を論ずる場合には、 $S=1$ から求めた前述の k_c には適切な修正が必要となる。その一方法として、支圧試験における応力分布の特徴と実際の破壊状況を考慮してつぎのような終局破壊荷重 P_2 を仮定しよう。それは、 $S=1$ の点をはさんである範囲 n とはい供試体半径の半分の半 ($d/4$) の範囲が破壊条件を満たすときの荷重と P_2 とする方法である (仮定 4)。このとき P_2 と σ_c 、 σ_t の関係はたとえば先の例については図-5の実線のものである。ここに、

$$k'_c = (-P_2/A_c)/\sigma_c = (P_2/A_c)/n\sigma_t \quad (5)$$

(5) 式の関係を用いると (1) 式で定義される支圧強度 σ_u は σ_c 、 σ_t との関係式としてつぎのように求まる。

$$\sigma_u/\sigma_c = k'_c \cdot A_c/A_b \quad (6-a)$$

$$\sigma_u/\sigma_t = -nk'_c \cdot A_c/A_b \quad (6-b)$$

$n = -\sigma_c/\sigma_t$ を考慮する限り両者は同一であり、支圧強度の表示式を破壊の状態にかかわらず (6-a) 式で統一しておくことは可能である。このとき k'_c を適当に換算することによって従来の支圧強度の様々な表示式が導かれることは言うまでもない。しかし、このようにして得られる表示式の係数はあくまで供試体の応力分布に關係する因子 h/d 、 d_o/d 、 m 、および破壊条件に關係する因子 n によって決まる値であって、 k'_c の値から想像されるように、簡単な形の表示式で、しかも広範囲の条件に亘って 1 つの係数で満足するような表示式は望み難い。また、従来の表示法が示すように σ_u と σ_c との関連のみを重視し、 σ_t との関係が活かされていない点、および σ_u に対するポアソン数 m の影響が省みられなかった点において不十分であったことは否めない。

最後に、種々の条件のもとにおける σ_u/σ_c の値を (5) 式によって理論的に求めた結果の 1 例を示せば図-6 のようである。実際の支圧試験においては、 h/d が 1.0 以下の小さい場合とか、載荷割合 d_o/d が 0.5 以上と大きい場合とかには、摩擦力の影響を考慮する必要がある。

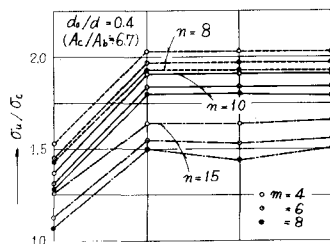
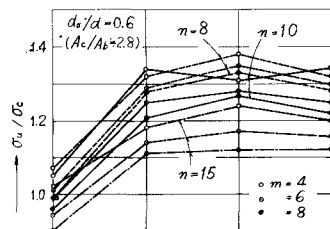
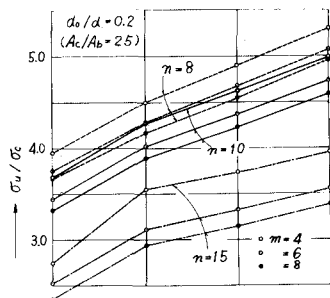
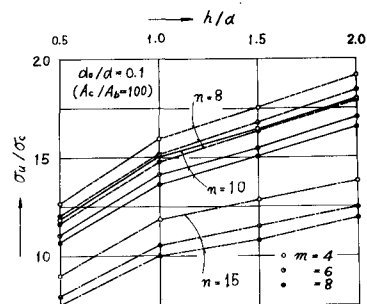


図-6